

6. 広報および調査

講演記録等を載せた“NKZ”および広報誌「財团案内」の出版、ならびに仁科博士、朝永博士をめぐる科学史資料の収集調査を行っています。

§ 2. 仁科記念賞

「仁科記念賞は、原子物理学およびその応用の分野できわめて優秀な成果をおさめた研究者に贈るものであります。この賞の特色は、功成り名遂げた大先輩に贈られるのではなく、むしろこれから活躍を大いに期待される若い研究者に贈られる点にあります。」(“NKZ”創刊号(1962) 43ページより)

これまでの受賞者とその業績および当時の所属を卷末に掲げます。

平成14年度の仁科記念賞の受賞者と受賞業績を以下に紹介します。

2002年度第48回 仁科記念賞 受賞者業績紹介

受賞者 小山勝二（京都大学大学院理学研究科教授）



研究題目 超新星残骸での宇宙線加速

宇宙の超高エネルギー現象を示す典型的な現象である宇宙線のエネルギースペクトルはベキ関数で表され、人工の加速器を超える超高エネルギー領域まで伸び続けている。すなわち、太陽などの恒星やX線星などで通常的に生じている熱的平衡状態に基づく過程とは異なり、非熱的過程によって宇宙線粒子が加速されていることを示している。宇宙線の加速源は宇宙線の発見以来半世紀以上にわたって長らく不明であり、天の川銀河に閉じこめられている宇宙線の生成と散逸のエネルギー取

支勘定から、超新星爆発が宇宙線を加速するエネルギー源であると推定されてきた。一方、非熱的なベキ型スペクトルを自然に説明するモデルとしてフェルミの統計的加速が古くから知られている。衝撃波ではこの統計的加速機構が非常に効率的に働くことから、超新星残骸での衝撃波によって宇宙線加速が実現されているものと推測してきた。しかしながら、超新星残骸における宇宙線粒子の加速を結論できる証拠をえることは長年の宿題として残してきた。

超新星残骸は通常、衝撃波で加熱された高温プラズマからの、制動放射の連続スペクトルと多数の元素の輝線からなる熱的放射スペクトルを示す。しかし、西暦1006年に爆発した超新星残骸SN1006には輝線がなく、単純なベキ関数の非熱的スペクトルが観測され、その原因と放射機構は長らく不明であった。小山氏は、超新星残骸SN1006を、世界初の高感度X線分光撮像衛星「あすか」で精密観測し、元素の輝線を伴う熱的スペクトルが残骸の内側の部分に限られ周辺部の球殻部分ではベキ型の非熱的スペクトルを持つことを示した。従来の解釈に代わって、加速された超高エネルギー電子が衝撃波面で圧縮された磁場中で引き起こすシンクロトロン放射によってベキ型のX線放射を説明した。観測事実のすべてを矛盾無く説明し、超新星残骸において超高エネルギー領域まで粒子が加速されることを実証した。X線のスペクトルが20keVに及ぶこと及び電波の放射強度との比較からえられる磁場の強さに対する制限などを考慮して、シンクロトロン放射する電子が少なくとも200TeVを超える超高エネルギーまで加速されていることを示した。さらに、陽子では放射損失が無視できるから宇宙線の主成分である陽子はこの超新星残骸において電子以上に高いエネルギーまで加速されると結論できることを指摘した。このように、超新星残骸SN1006の観測結果と小山氏による解釈は超新星残骸が 10^{15} eV近い粒子加速を行っていることを初めて実証した。引き続いて、「あすか」等のX線データによる銀河面のサーベイを行い、電波放射が弱くX線で明るい非熱的スペクトルを示すSN1006に似た別の超新星残骸RXJ1713.7-3946などを発見した。これらの超新星残骸においては、同じ100TeV以上の電子がシンクロトロン放射でX線を放射すると同時に、2.7Kマイクロ波光子をコンプトン効果で叩きあげてTeVガンマ線を生成することが予想される。実際に、TeV領域の超高エネルギーガンマ線が日豪共

同観測のCANGAROOグループによって検出され、超高エネルギー粒子加速が実際に行きていることが確認されている。

空間分解能のすぐれたX線衛星チャンドラの最新のデータによれば、超新星残骸SN1006の周辺部の非熱的スペクトル成分は薄いシート状のフィラメント部分から放射されている。加速が衝撃波面での電子や陽子の拡散過程による統計的加速による通常のモデルに基づくと、拡散を記述する粒子の散乱長が磁場中のジャイロ半径程度に短く、極めて効率の良い加速が実現していることを意味している。これまで太陽惑星圏において行われてきた衝撃波加速の精密な実証的研究を一層広い空間的スケールと巨大なエネルギー規模を持つ超新星残骸へと拡大・発展させる契機となり、衝撃波加速についての観測的研究の新たな場を開拓・提供して、一層の発展を触発しつつある。

小山氏は、宇宙の超高エネルギー現象を示す典型的な現象である宇宙線の加速源を初めて具体的に特定し、衝撃波による粒子加速の研究を一層発展させる研究成果をあげた。超新星残骸SN1006の観測は多くの研究機関の研究者の共同研究であるX線衛星の観測に基づくが、その業績は小山教授の一貫した主導によることは明白である。

[参考文献] (受賞対象となる業績についての代表的論文)

- Evidence for shock acceleration of high energy electrons in the supernova remnant SN1006, K. Koyama, R. Petre, E. Gotthelf, U. Hwang, M. Matsuura, M. Ozaki and S. Holdt, *Nature* 378 (1995) 255–256
- Particle acceleration in SNRs, K. Koyama, *Adv. Space Research* 25 (1998) 681–687

受賞者 樽茶清悟 (東京大学大学院理学系研究科教授)

研究題目 人工原子・分子の実現



樽茶清悟氏は、半導体に最先端の微細加工を施すことにより、形状と電子数を精密に制御できる人工原子・分子を実現した。さらに、そのエネルギー準位を決定する電流測定法を確立し、磁場や形状により電子状態を変え、電子状態に及ぼす量子効果と電子間相互作用の効果を明らかにした。また、スピン三重項状態での抵抗異常の発見などにより、近藤効果の新しい側面を切り開いた。この研究はナノテクノロジーとナノ物理学分野に新しい潮流を生み出した。

樽茶清悟氏の開発した縦型人工原子は、半導体ヘテロ構造を用いて作製した2重障壁構造を円柱状に加工し、周りを金属ゲートで覆った構造をもつ。そこでは、電子を2重障壁により面状に閉じこめることにより2次元電子とし、さらに、ゲート電極に負の電圧を印加し電子をさらに面内で閉じこめることにより人工原子を作る。このとき、ゲート電極による閉じこめポテンシャルはほぼ2次元調和ポテンシャルと見なすことができる。電子数を0個から1個ずつ正確に変化するためには、2重障壁部分の半導体と井戸の部分の半導体の組成、厚みなどを精密に制御する必要がある。そのため、このようにして人工原子を実現できたのは世界中で氏の研究グループだけである。なお、円柱状から四角柱状へと人工原子の形状を変化させることもできる。また、障壁の数を増やすことにより、二つの人工原子からなる人工分子も作ることができる。この場合、人工原子の間の結合強度は障壁の高さと厚みでほぼ自由に変えられる。

まず、このような縦型人工原子に電子を追加するために必要なゲート電圧から電子のエネルギーを測定し、原子と同様に、人工原子でも殻構造をもち、フント則が成立することを示した[1]。さらに、ゲート電圧とソースードレイン電圧の両方を変化させて電流を測定し、各電子数ごとに磁場の中の人工原子の励起状態のスペ

クトルを決定した〔2〕。さらに、人工原子のエネルギー準位を磁場により制御し、軌道準位が縮退する付近で一重項状態から3重項状態へ不連続に変化することを観測し、クーロン相互作用による交換エネルギーを定量的に決定することに成功した〔3〕。また、軌道準位がほぼ縮退し、1重項状態と3重項状態が縮退するときに、近藤効果が急激に強くなる現象を発見した〔4〕。量子ドットの近藤効果についてはいくつか理論的予言があり、その最初の観測はMITのグループにより行われたが、軌道縮退の近藤効果は新しい発見である。また、3重項状態の近藤効果は通常の金属では観測されていない新現象である。

2次元面内にゲート電極を配置することによって横型人工原子も作れる。横型人工原子の電子数を精密に決めるることは難しいが、ゲート電圧により、電極との結合などをほぼ自由に制御できる特徴をもつ。この横型人工原子では、理論的に予言されていたユニタリ極限の近藤効果の観測にも世界で初めて成功した〔5〕。さらに、人工原子を組み合わせた横型人工分子を作り、分子状の結合軌道ができるることを示し、マイクロ波の実験で、結合反結合軌道間の共鳴吸収を観測し、量子ビットができるることを示した〔6〕。このような人工分子における電子間相関効果の研究ではさらなる発展が期待される。

以上、樽茶清悟氏は、精密に制御された人工原子・分子を実現し、その電気伝導現象を調べることにより、その電子状態、特に電子間相互作用の効果を明らかにし、新しい現象を発見した。これは、氏の独創的な発想と高度な実験技術によって初めて可能となったもので、学術的な価値の高い世界に誇るべき研究業績である。

〔参考文献〕

- 〔1〕 Shell filling and spin effects in a few electron quantum dot
S. Tarucha, D. G. Austin, and T. Honda, Phys. Rev. Lett. 77, 3613 (1996).
- 〔2〕 Excitation spectra of circular, few-electron quantum dots
L. P. Kouwenhoven, T. H. Oosterkamp, M. W. S. Danoesastro, M. Eto, D. G. Austin, T. Honda, and S. Tarucha, Science 278, 1788 (1997).
- 〔3〕 Direct Coulomb and exchange interaction in artificial atoms
S. Tarucha, D. G. Austin, Y. Tokura, W. G. van der Wiel, and L. P. Kouwenhoven, Phys. Rev. Lett. 84, 2485 (2000).
- 〔4〕 Kondo effect in an integer-spin quantum dot
S. Sasaki, S. De Franceschi, J. M. Elzerman, W. G. van der Wiel, M. Eto, S. Tarucha, and L. P. Kouwenhoven, Nature 405, 764 (2000).
- 〔5〕 The Kondo effect in the unitary limit
W. G. van der Wiel, S. De Franceschi, T. Fujisawa, J. M. Elzerman, S. Tarucha, and L. P. Kouwenhoven, Science 289, 2105 (2000).
- 〔6〕 Microwave spectroscopy of a quantum-dot molecule
T. H. Oosterkamp, T. Fujisawa, W. G. van der Wiel, K. Ishibashi, R. V. Hijman, S. Tarucha, and L. P. Kouwenhoven, Nature 395, 873 (1998).

受賞者 永井泰樹

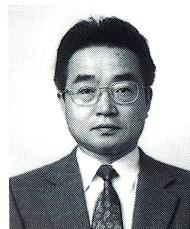
(大阪大学核物理

研究センター教授)

井頭政之

(東京工業大学原子炉工学

研究所助教授)



研究題目 原子核による速中性子捕獲現象の研究

恒星内温度に相当するkeV領域の中性子の原子核による捕獲反応は従来 s 波中性子の吸収過程が定説とされてきた。永井・井頭両氏は、原子核による中性子の捕獲断面積を精密に測定する新しい装置を開発し、これを用いた研究で p 波の直接捕獲過程が存在し、それが s 波の寄与よりもはるかに大きいことを実験的に初めて明らかにした。

恒星内の密度は地上の実験室における密度よりもはるかに高い。しかし、その恒星内で鉄以上の重い原子核は、原子核に 1 個の中性子が捕獲（吸収）される反応を通じ合成されている。同時に 2 個以上の中性子が吸収されることはない。そのため重元素合成が進行する恒星内温度に相当する温度を持つ中性子を地上実験室で用意できれば恒星内元素合成を再現できる。そこで地上で高速の中性子を作り原子核に衝突させて、新しい原子核が合成された証拠になる信号を高い感度で検出する。恒星内温度は、1億度から10億度程度であると考えられている。この温度に相当する中性子は10keV（キロ電子ボルト）から100keVのエネルギーを持っている（速度にすると毎秒1500–4500km）。そのような速中性子は実験室で小型のバンデグラフ型の加速器で、2MeV弱のエネルギーをもつパルス化された高強度の陽子を、リチウム 7 に照射して生成する。パルス陽子を使用するのは、中性子が電気を持っていないため磁石等でそのエネルギーを測ることができないので飛行時間差法を用いるためである。

質量数の軽い原子核が keV 中性子を捕獲する反応の断面積（捕獲断面積）は数マ

イクロバーンと極めて小さい。一方、この中性子と原子核の全反応断面積は数バーンもある。そのため新しい原子核の証拠となる真の信号と偽の信号の比は 1 対 100 万である。真の信号を如何に高感度で検出し偽の信号を如何に減衰させるか、これが地上実験の成否を握っていた。永井・井頭氏らは真の信号検出器として検出効率・エネルギー分解能共に優れたNaI (Tl) 検出器を使用した。この検出器は軽い原子核に中性子が捕獲された際放出される不連続なエネルギーを持つ γ 線を検出できる。そしてこの γ 線は生成される新しい原子核に特徴的であり、それを検出できれば真の信号を偽の信号から取り出すことができた事になる。しかしこの検出器は中性子捕獲断面積が大きい汎素を含むためkeV中性子の捕獲実験で成功した例は過去なかった。（従来、液体シンチレーション検出器が利用されてきたが真の信号識別能力が低く又中性子の偽信号のため有意義な結果は得られていないかった）。試料の原子核で散乱され多量の偽信号の要因となる中性子を如何に効率良く減衰させるかがポイントであった。（散乱される中性子はエネルギーを減じる。一方中性子の原子核に対する捕獲断面積は概ね中性子の速度が遅くなると、それに反比例して大きくなるので…熱中性子はkeV中性子の1000倍…検出器周辺に侵入する僅かの中性子も大きな偽信号を生む。）散乱された中性子は、リチウム 6 を含むリチウム・ハイドライドとボロン 10 を含むボロン入りポリエチレンを用い減衰させることに成功した。例えば前者では、試料で散乱されNaI (Tl) 検出器に侵入してくるkeV中性子は、先ず水素との衝突で熱化され、そして熱中性子の捕獲断面積が非常に大きいリチウム 6 によって γ 線等の新しい偽信号の要因となる生成物を作ることなく減衰する。この方法を開発した結果先に述べた極めて小さい中性子捕獲断面積を測定できたのである。

不連続 γ 線を検出する方法で得た¹²C及び¹⁶Oの結果は従来の値に比べ5倍及び170倍も大きい。これはkeV領域の中性子捕獲反応が s 波の中性子を原子核が直接捕獲して進行するとの定説を覆す結果であり、 p 波の直接捕獲過程の存在を実験的に初めて明らかにすることとなった。

金属度の低い恒星内で¹²C及び¹⁶Oが重元素を合成するためのkeV中性子を大量に消費することが分かった。その結果、 s 過程による重元素の合成量が大きく減少

することが新たに判明し、「恒星進化と元素合成の模型」の再構築を迫るものとなつた。更に ^{16}O は太陽系のr過程元素合成量の評価値も大きく変化させることになった。最近、富士吉田で開催された「原子核と宇宙」国際会議でも、その分野の世界的指導者であるS.Woosley氏が「 ^{16}O の実験結果は、これまでに考えられた効果だけではなく、 α フリーズアウトのr過程元素合成に加え、太陽系のr過程元素合成でも相当なる影響を与えるだろう」とのコメントを行つた。すなわち、本研究により原子核によるkeV中性子の捕獲反応にp波の吸収過程が重要な寄与をすることが初めて明らかにされ、従来s波の中性子吸収のみを考慮してきた元素合成模型の理論計算を全体的に根底から見直す必要を迫る結果となり、それが世界的に認知されたのである。

[参考文献](受賞対象となる業績についての代表的論文)

- Y. Nagai, M. Igashira et al., Measurement of the neutron-capture rate of the ^{12}C (n, γ) ^{13}C reaction at stellar energy, *Astrophysics J.* 372 (1991) 683
- Y. Nagai, M. Igashira et al., Capture rate of the ^7Li (n, γ) ^8Li reaction by prompt gamma-ray detection, *Astrophysics J.* 381 (1991) 444
- M. Igashira, Y. Nagai et al., Measurement of the ^{16}O (n, γ) ^{17}O reaction cross sections at stellar energy and the critical role of nonresonant p-wave neutron capture, *Astrophysics J.* 441 (1995) L89
- T. Kikuchi, Y. Nagai, M. Igashira et al., Nonresonant direct p- and d-wave neutron capture by ^{12}C , *Phys. Rev. C* 57 (1998) 2724
- M. Rayet and M. Hashimoto, *Astron. Astrophys.* 354 (2000) 740

§ 3. 仁科記念奨励金

この研究奨励金は、わが国の若い研究者の海外での研究への援助(1956年度から)、および発展途上国の研究者の来日研究への援助(1992年度以降)にあてられております。

研究者の海外での研究への援助について述べますと、仁科記念財団が派遣する研